

EVALUASI PENURUNAN KONSOLIDASI TANAH DI SEMARANG UTARA BERDASARKAN KORELASI N-SPT DENGAN m_v

Hendra Masvika ¹⁾, Agus Darmawan Adi ²⁾, Fikri Faris ²⁾

Abstract

The negative impact of land subsidence in the northern part of Semarang City has been felt by the society for many years. Land subsidence coupled with coastal abrasion, sea water intrusion and tidal floods into residential areas further exacerbates physical and environmental damage. Constructive of soil condition which are dominated alluvium sedimentary soils with a very soft to medium consistency and easily compressible the consolidation process is predicted to continue for a very long time. Therefore, sustainable geotechnical studies are needed to evaluate the consolidation settlement in North Semarang. The aim of this study is to predict magnitude and rate of land subsidence due to consolidation. The consolidation parameters for each depth of the soil layer are determined from correlation N-SPT with m_v . The result of calculation using 1 D Terzaghi method shows that the magnitude of settlement is quite varied for a very long period of time, depending on the thickness of the consolidation layer and the surface load. Numerical simulation using SIGMA/W is given as a comparison in this calculation.

Keywords: land subsidence, consolidation, North Semarang, sedimentary soils, easily compressible

Abstrak

Dampak negatif penurunan tanah di Kota Semarang bagian utara telah dirasakan oleh masyarakat selama bertahun-tahun. Penurunan tanah yang dibarengi dengan abrasi pantai, intrusi air laut dan banjir pasang air laut ke permukiman penduduk semakin memperparah kerusakan fisik dan lingkungan. Kondisi tanah penyusun yang didominasi oleh tanah endapan *alluvium* dengan konsistensi sangat lunak sampai medium dan mudah mampat mendorong proses konsolidasi diprediksi akan terus berlangsung untuk waktu yang sangat lama. Oleh sebab itu, perlu dilakukan kajian geoteknik berkelanjutan untuk mengevaluasi penurunan konsolidasi di Semarang Utara. Tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi besar dan laju penurunan tanah akibat konsolidasi. Adapun parameter konsolidasi untuk setiap kedalaman lapisan tanah yang ditinjau ditentukan dari hasil korelasi antara N-SPT dengan m_v . Hasil perhitungan dengan metode 1 D Terzaghi menunjukkan bahwa besar penurunan tanah cukup bervariasi untuk jangka waktu sangat lama, tergantung pada ketebalan lapisan konsolidasi dan beban permukaan. Simulasi numeris menggunakan SIGMA/W diberikan sebagai perbandingan dalam perhitungan ini.

Kata kunci: penurunan tanah, konsolidasi, Semarang Utara, tanah endapan, mudah mampat

I. PENDAHULUAN

Ditinjau secara geologi, Kota Semarang bagian utara merupakan dataran rendah yang berdiri diatas lapisan tanah endapan *alluvium* lunak yang berbatasan langsung dengan pantai utara Pulau Jawa. Lapisan tanah endapan *alluvium* memanjang dari arah barat ke timur, yaitu dari Kec. Tugu sampai dengan Kec. Genuk. Tanah endapan *alluvium* yang bersifat mudah mampat atau mempunyai kompresibilitas tinggi mendukung terjadinya penurunan tanah akibat proses konsolidasi.

Hasil kajian tentang struktur geologi dan pola morfologi menunjukkan bahwa pola penurunan tanah di Kota Semarang tidak berhubungan langsung dengan aktivitas tektonik tetapi lebih banyak disebabkan oleh faktor endapan *alluvium* berumur muda yang berkonsolidasi secara alamiah (Wardana dkk., 2014). Konsolidasi terjadi jika tanah lunak jenuh air mengalami pemampatan akibat pembebanan sehingga volume tanah berkurang akibat keluarnya air pori dalam waktu yang sangat lama.

Penurunan konsolidasi tanah yang dibarengi dengan abrasi pantai dan meluasnya genangan akibat banjir pasang air laut (rob) menyebabkan tenggelamnya beberapa wilayah daratan di daerah Semarang Utara. Berbagai macam kerusakan bangunan, infrastruktur,

¹ Program studi S2 Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Pos-el : hendramasvika@gmail.com

² Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Pos-el : adadhi2@yahoo.com; fikri.faris@ugm.ac.id.

lingkungan, serta dampak sosial dan ekonomi yang dirasakan oleh masyarakat harus menjadi peringatan tentang pentingnya langkah penanganan bencana tersembunyi ini. Diperlukan kajian geoteknik berkelanjutan untuk mengevaluasi besar penurunan tanah yang terjadi.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung besar penurunan konsolidasi dan laju penurunan tanah di Semarang Utara. Selain itu, simulasi numeris menggunakan SIGMA/W diberikan sebagai perbandingan terhadap perhitungan manual dengan metode 1 D Terzaghi.

II. TINJAUAN PENELITIAN

Konsolidasi adalah proses berkurangnya volume tanah jenuh air berpermeabilitas rendah yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total dan terdisipasinya air pori terhadap fungsi waktu (Craig, 2004). Lamanya waktu yang dibutuhkan sampai dengan konsolidasi selesai tergantung pada besar kecilnya permeabilitas tanah.

Menurut Atkinson dan Bransby (1982), Terzaghi (1936) mengusulkan teori konsolidasi 1 D untuk tanah lempung jenuh dengan persamaan differensial :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

dengan $\frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ merupakan perubahan gradien tekanan hidrolik dan laju perubahan tekanan air pori hidrostatik secara berurutan.

2.1. Penurunan Konsolidasi (S_c)

Penurunan konsolidasi adalah terjadinya deformasi (*displacement*) vertikal pada suatu massa tanah sehingga menyebabkan adanya perubahan volume tanah pada saat proses konsolidasi berlangsung (Craig, 2004). Apabila diasumsikan tidak terjadi regangan lateral dan deformasi hanya pada arah vertikal (1 D), maka penurunan konsolidasi dihitung dengan persamaan :

$$S_c = m_v \cdot \Delta \sigma' \cdot H \quad (2.2)$$

dengan $m_v, \Delta \sigma', H$ merupakan *coefficient of volume compressibility*, tambahan tegangan, dan tebal lapisan tanah secara berurutan.

2.2. Parameter Konsolidasi

Menurut BS 1377:Part 5:1990 (1995) pada pengujian konsolidasi 1 D di laboratorium digunakan parameter m_v dan c_v untuk menghitung besar dan laju penurunan konsolidasi, dengan nilai m_v dihitung untuk kenaikan tegangan 100 kN/m^2 diatas tegangan *overburden* efektif.

Menurut Craig (2004) apabila m_v (m^2/kN) dinyatakan dalam angka pori, maka nilai m_v dapat dihitung dengan persamaan :

$$m_v = \frac{1}{(1 + e_0)} \frac{e_0 - e_1}{(\sigma_1' - \sigma_0')} \quad (2.3)$$

dengan $e_0, e_1, (\sigma_1' - \sigma_0')$ merupakan angka pori awal, angka pori diakhir pengujian dan kenaikan tegangan efektif secara berurutan.

2.3. Laju Konsolidasi

Menurut Craig (2004) untuk mengevaluasi nilai c_v dapat digunakan metode akar waktu sesuai dengan usulan Taylor (1942), dengan persamaan :

$$c_v = \frac{0,848d^2}{t_{90}} \quad (2.4)$$

dengan c_v, d, t_{90} merupakan koefisien konsolidasi, panjang lintasan drainase dan waktu konsolidasi pada saat derajat konsolidasi 90 % secara berurutan.

Sesuai dengan persamaan differensial konsolidasi 1 D Terzaghi pada Persamaan 2.1, nilai c_v dapat ditentukan dengan rumus :

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (2.5)$$

dengan k merupakan koefisien permeabilitas.

Menurut Craig (2004) faktor waktu sesuai usulan Casagrande (1938) dan Taylor (1948), faktor waktu dapat dihitung dengan persamaan empiris :

$$T_v = \frac{\pi}{4} U^2 ; U < 0,60 \quad (2.6)$$

$$T_v = -0,933 \log(1 - U) - 0,085 ; U > 0,60 \quad (2.7)$$

dengan T_v, U adalah faktor waktu dan derajat konsolidasi rata-rata secara berurutan.

Menurut Craig (2004) hubungan faktor waktu dan waktu konsolidasi dapat ditentukan dengan persamaan :

$$T_v = \frac{c_v t}{d^2} \quad (2.8)$$

dengan t, d^2 merupakan waktu konsolidasi dan panjang lintasan drainase secara berurutan.

2.4. Penelitian Sebelumnya

Sophian (2010) melakukan penelitian penurunan konsolidasi tanah di daerah Tawangsari, Tanah Mas dan Stasiun Poncol Kota Semarang. Analisis dilakukan dengan menghitung tekanan *overburden* efektif setiap lapisan tanah lempung, kemudian dihitung besar penurunan konsolidasi menggunakan metode 1 D Terzaghi. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan penurunan tanah dari hasil pengukuran elevasi patok dilapangan. Adapun hasil penelitian Sophian (2010) ditunjukkan seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Penurunan tanah di Semarang pesisir pantai (Sophian, 2010)

Waktu penurunan	St. Tawang		Tanah Mas		St. Poncol	
	Penurunan tanah (cm)					
	Terzaghi	Monitoring Elevasi	Terzaghi	Monitoring Elevasi	Terzaghi	Monitoring Elevasi
Rata-rata/tahun	3,98	8	6,59	12	7,43	8
10 tahun	39,8	80	65,9	120	74,3	80

Kuehn dkk. (2010) melakukan penelitian penurunan tanah di Kota Semarang dengan metode *Stable Point Network* (SPN). Pengukuran dilakukan selama periode 2002-2006 dengan mengukur gerakan vertikal tanah pada gambar satelit SAR. Diperoleh hasil penelitian penurunan tanah dengan laju antara 0,1-10 cm/tahun, dengan wilayah Semarang pesisir pantai arah utara timur mengalami penurunan tanah terbesar dengan laju >8 cm/tahun.

Abidin dkk. (2010) melakukan penelitian penurunan muka tanah di Kota Semarang dengan menggunakan metode inSAR, survei GPS, *microgravity* dan survei topografi. Berdasarkan analisis data topografi,

teknik inSAR dan *microgravity* diperoleh laju penurunan tanah maksimum selama periode 1979-2006 mencapai 15 cm/tahun berada di kawasan pesisir pantai (utara). Hasil survei GPS selama periode Juli 2008-Juni 2009 menunjukkan bahwa terjadi penurunan tanah dengan laju antara 0,8-13,5 cm/tahun.

Lubis dkk. (2011) melakukan penelitian penurunan tanah di Kota Semarang berdasarkan data inSAR menggunakan satelit ALOS-PALSAR. Penurunan tanah diartikan sebagai deformasi permukaan tanah pada arah vertikal dan horizontal berdasarkan data foto satelit pada arah *ascending* dan *descending*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa selama periode Januari 2007-Januari 2009 diperoleh laju penurunan tanah mencapai 8 cm/tahun dengan tingkat penurunan tanah ekstrim berada di daerah pesisir pantai, dataran rendah dengan pengambilan air tanah berlebih, kawasan industri dan alih fungsi lahan pertanian menjadi perumahan dan daerah industri.

Sarah dkk. (2011) melakukan pemodelan penurunan tanah di daerah Tanah Mas-Pelabuhan Kota Semarang dengan menggunakan metode elemen hingga. Skenario pembebanan diterapkan pada pemodelan numeris dengan Program Plaxis, yaitu tambahan beban akibat perubahan elevasi muka air tanah dan perubahan elevasi muka air tanah ditambah dengan asumsi beban rencana bangunan. Hasil pemodelan numeris Plaxis kemudian dibandingkan dengan perhitungan konvensional 1 D Terzaghi dan validasi diberikan dengan data pengukuran penurunan tanah lapangan berdasarkan survei GPS dan metode PSI. Penurunan konsolidasi akibat faktor pembebanan dan penurunan elevasi muka air tanah lebih mendekati besar penurunan tanah dilapangan berdasarkan data survei GPS. Hasil penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Sarah dkk. (2012) melakukan pemodelan numeris penurunan tanah pada lintasan Bandaharjo-Poncol, Kota Semarang menggunakan Program Plaxis. Besar dan laju penurunan tanah dihitung untuk tempo 5 tahun mulai dari tahun 2002-2007. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa laju penurunan tanah dengan skenario pembebanan dan penurunan muka air tanah untuk lokasi Bandaharjo-Poncol adalah sebesar 2,1-5 cm/tahun dan Poncol-Wiroto sebesar 1-3 cm/tahun. Validasi diberikan menggunakan peta laju penurunan tanah dari PLG-BGR.

Tabel 2.2. Penurunan tanah di Tanah Mas-Pelabuhan (Sarah dkk., 2011)

Section	Scenario A (Drawdown of GWL)				Scenario B (Drawdown of GWL + Surface Loading)				
	Settlement 2008-2009 (cm)		Rate of subsidence (cm/year)		Settlement 2008-2009 (cm)		Rate of subsidence (cm/year)		Rate of subsidence by GPS (cm/year)
	Terzaghi	Plaxis	Terzaghi	Plaxis	Terzaghi	Plaxis	Terzaghi	Plaxis	
1	1	3	1	3	1	8	1	8	3-6
2	2	2	2	2	2	3	2	3	3-6
3	1	3	1	3	2	4	2	4	3-6
4	2	4	2	4	2	4	2	4	3-6

Soedarsono dan Arief (2012) melakukan penelitian untuk memprediksi amblesan tanah pada dataran aluvial di Kota Semarang bagian bawah menggunakan metode 1 D Terzaghi dan simulasi numeris dengan Plaxis. Berdasarkan perhitungan dengan metode 1 D Terzaghi, diperoleh hasil penurunan tanah terbesar berada di daerah Tambak Lorok sebesar 127,7 cm dengan laju 4,31 cm/tahun. Hasil simulasi numeris menunjukkan bahwa penurunan konsolidasi tanah terbesar berada di daerah Tanjung Mas dan Tambak Lorok (Semarang Utara) dengan penurunan tanah sebesar 107,8 cm dengan laju sekitar 3,64 cm/tahun.

Gumilar dkk. (2013) melakukan penelitian berupa pemetaan dan evaluasi dampak penurunan tanah di Kota Semarang dengan metode pengukuran elevasi, inSAR, *microgravity*, dan survei GPS. Hasil penelitian dengan metode beberapa diatas menunjukkan bahwa laju penurunan tanah sebesar 19 cm/tahun terjadi selama periode 1999-2011. Hasil pengamatan dengan GPS pada periode 2008-2011 menunjukkan bahwa penurunan tanah terjadi secara spasial dan temporal dengan laju penurunan rata-rata 6-7 cm/tahun.

Yuwono dkk. (2013) melakukan analisis geospasial penyebab penurunan muka tanah di Kota Semarang menggunakan metode sipat datar, survei GPS, dan teknik inSAR.

Berdasarkan karakteristik penurunan muka tanah terhadap faktor penyebab penurunan tanah dan kondisi tutupan lahan dapat diidentifikasi bahwa laju penurunan muka tanah sebesar 0-13 cm/tahun terjadi di wilayah pesisir pantai dengan kecenderungan meningkat ke arah utara timur laut Kota Semarang.

Abidin dkk. (2013) melakukan penelitian mengenai karakteristik, dampak dan penyebab terjadinya amblesan tanah di pesisir Kota Semarang dengan membandingkan pengukuran GPS tahun 2008-2011 dengan metode pengukuran lapangan, inSAR dan *microgravity*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa amblesan tanah terjadi secara spasial dan temporal dengan laju penurunan 6-7 cm/tahun sampai dengan 14-19 cm/tahun. Wilayah Semarang bagian utara mengalami penurunan tanah paling besar akibat konsolidasi tanah, pengambilan air tanah berlebih dan beban konstruksi di permukaan.

Soebowo dkk. (2014) melakukan penelitian tentang geologi bawah permukaan dan amblesan tanah di Kota Semarang. Penyelidikan dilakukan hingga kedalaman 80 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kedalaman 5-60 m terdapat lapisan lempung dengan konsistensi sangat lunak sampai lunak yang bersifat mudah mampat dan masih berkonsolidasi secara alamiah.

Yuwono dkk. (2016) melakukan survei pendahuluan dan pengamatan penurunan tanah di Semarang bagian utara-Demak dengan menggunakan metode survei GPS selama kurun waktu 2011, 2013, 2014 & 2015. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan tanah terbesar terjadi di Semarang Utara, Semarang Timur dan Gayamsari dengan laju 6-9 cm/tahun sampai dengan 9-15 cm/tahun.

Andreas dkk. (2017) melakukan penelitian tentang adaptasi dan mitigasi penurunan tanah di Kota Semarang berdasarkan survei GPS. Pengukuran dengan GPS selama periode 2008-2016 menunjukkan bahwa wilayah pesisir pantai utara ke arah timur laut mengalami penurunan tanah paling besar dengan rentang antara 73,75 – 91,15 cm yang berada di daerah Semarang Utara, Genuk dan Gayamsari.

2.5. Kondisi Terkini Penurunan Tanah di Semarang Utara

Pemantauan di lapangan menunjukkan bahwa beberapa dampak negatif akibat penurunan konsolidasi tanah seperti: keretakan

bangunan, kerusakan infrastruktur, genangan air pasang air laut (rob), hilangnya daratan dan tenggelamnya rumah penduduk, hingga saat ini masih dirasakan oleh masyarakat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.

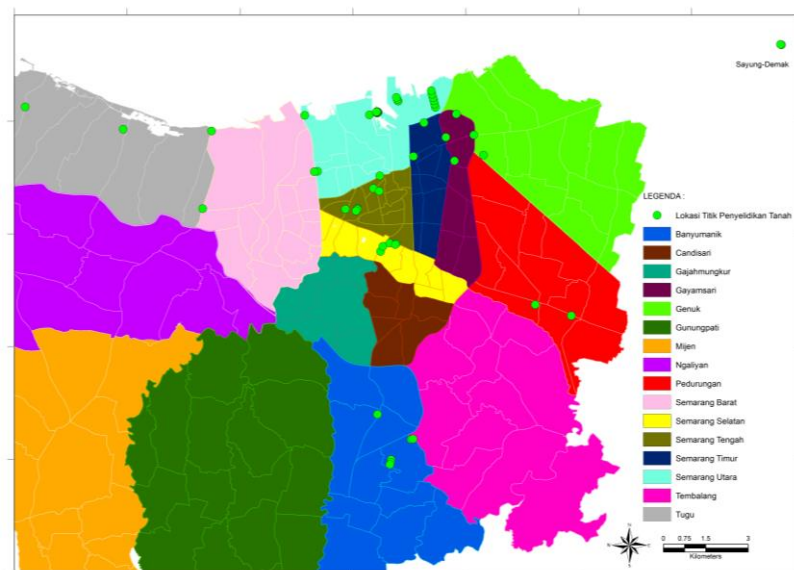
III. METODE

Dalam penelitian ini dilakukan pengumpulan data laporan penyelidikan tanah untuk pekerjaan desain konstruksi dari berbagai laboratorium mekanika tanah. Umumnya laporan tersebut tidak didesain untuk perhitungan penurunan konsolidasi, sehingga

untuk menentukan parameter nilai m_v pada kedalaman lapisan tanah yang ditinjau, digunakan pendekatan korelasi antara N-SPT dengan m_v . Selanjutnya dilakukan stratigrafi berdasarkan data *borlog*, perhitungan besar penurunan konsolidasi (S_c) dan laju penurunan tanah menggunakan teori 1 D Terzaghi, dan simulasi numeris dengan *software* SIGMA/W. Diperoleh sebanyak 56 titik lokasi penyelidikan tanah di Kota Semarang yang digunakan untuk korelasi N-SPT dengan m_v , seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 2.1. Dampak negatif penurunan konsolidasi tanah di Semarang Utara



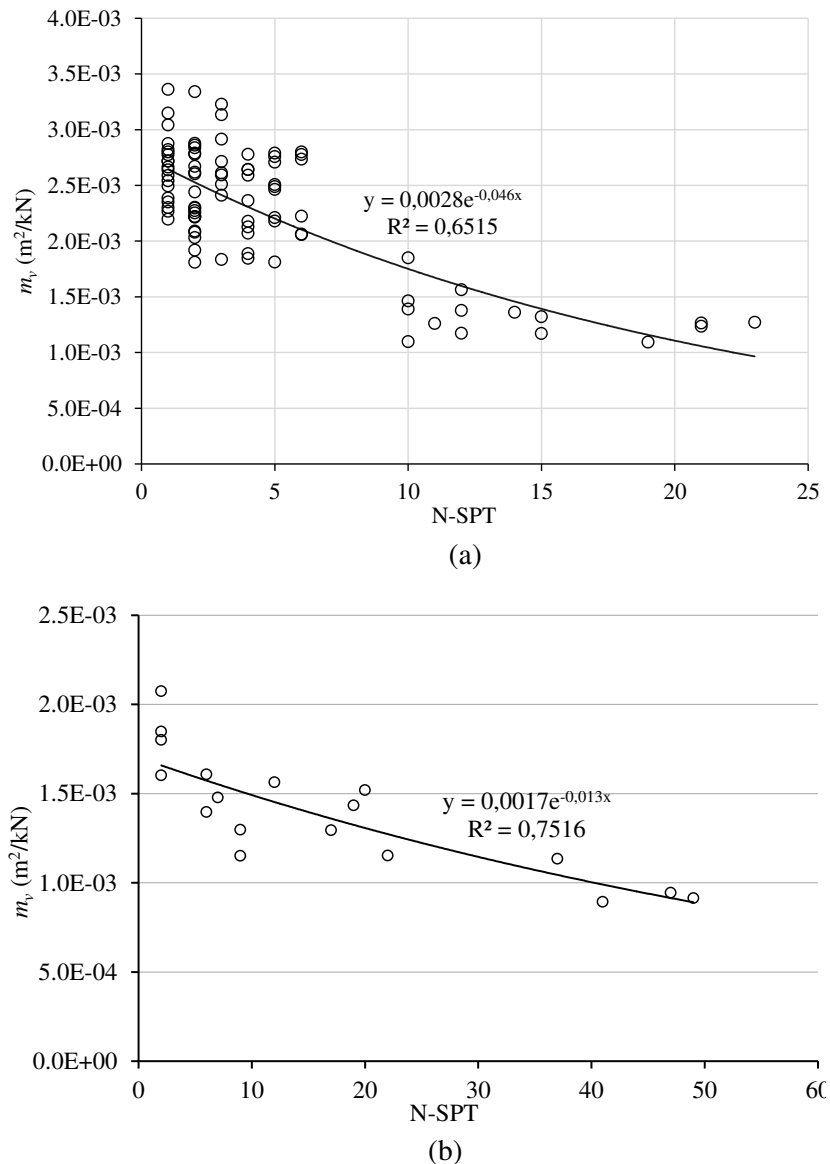
Gambar 3.1. Sebaran lokasi titik penyelidikan tanah untuk korelasi N-SPT dengan m_v

IV. HASIL DAN DISKUSI

4.1. Korelasi nilai N-SPT dengan m_v

Berdasarkan data hasil pengeboran (*borehole*) dan uji konsolidasi di laboratoium yang diperoleh, dapat dilakukan korelasi antara N-SPT dengan m_v untuk mendapatkan nilai m_v pada sembarang kedalaman dengan nilai N-SPT tertentu secara pendekatan. Pemisahan korelasi

nilai m_v pada tanah lempung dan lanau dilakukan berdasarkan hubungan m_v terhadap c_v dan k sebagaimana Persamaan (2.5), dengan asumsi bahwa besarnya nilai k pada tanah lempung dan lanau mempunyai nilai rentang yang berbeda. Adapun hasil korelasi antara nilai N-SPT dengan m_v untuk tanah lempung dan lanau di Kota Semarang ditunjukkan seperti pada Gambar 4.1.



dikarenakan minimnya pengujian konsolidasi untuk tanah lanau di Kota Semarang. Selain itu, sebaran data yang diperoleh sebagian besar berada dibagian utara Kota Semarang yang didominasi oleh tanah lempung. Didapatkan nilai R^2 sebesar 0,7516 dengan persamaan :

$$m_v = 0,0017e^{-0,013N} \quad (4.2)$$

Berdasarkan Persamaan 4.1 dan Persamaan 4.2 diatas, dapat dihitung untuk nilai N-SPT=1 pada tanah lempung diperoleh nilai m_v sebesar $2,69 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$ secara pendekatan. Dengan cara yang sama dapat ditentukan nilai m_v sesuai dengan nilai N-SPT dan kedalaman lapisan tanah yang ditinjau, berlaku juga pada tanah lanau. Nilai m_v hasil korelasi ini selanjutnya digunakan untuk perhitungan manual penurunan konsolidasi dan input parameter konsolidasi pada simulasi numeris.

4.2. Stratigrafi Lapisan Tanah

Ditentukan 6 titik penyelidikan tanah di daerah Kecamatan Semarang Utara yang meliputi Jembatan Gondomono (perbatasan antara Kelurahan Panggung Kidul dan Kelurahan Bulu Lor), Gedung BMKG dan Kamla (Pelabuhan Tanjung Mas), Terminal Tangki PT. AKR (Pelabuhan Tanjung Mas), Instalasi E-RTG Terminal Peti Kemas (Pelabuhan Tanjung Mas), *Jetty* kapal nelayan (Tambak Lorok) dan Gedung TPI baru (Tambak Lorok). Adapun gambar tipikal stratigrafi lapisan tanah dan denah lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Hasil stratigrafi tipikal di Titik A (Jembatan Gondomono) menunjukkan bahwa di bawah tanah permukaan (lempung kelanauan) terdapat lapisan tanah lempung dengan ketebalan 29,5 m dan lensa pasir setebal 3 m pada kedalaman 32 m, dengan kedalaman *borehole* mencapai 40 m di bawah permukaan tanah. Terdapat tanah timbunan setinggi 2 m.

Lokasi Titik B (Gedung BMKG dan Kamla) berada di Kel. Bandarharjo. Hasil stratigrafi tipikal di Titik B menunjukkan bahwa terdapat tanah lempung dengan ketebalan >30 m berada di bawah tanah timbunan setebal 5 m dengan kedalaman *borehole* mencapai 40 m di bawah permukaan tanah.

Titik C (Terminal Tangki PT. AKR) berada di Kel. Tanjung Mas. Hasil stratigrafi

tipikal di Titik C menunjukkan bahwa terdapat lapisan tanah lempung dengan ketebalan >50 m berada di bawah tanah timbunan setebal 3 m. Kedalaman *borehole* mencapai 60 m di bawah permukaan tanah.

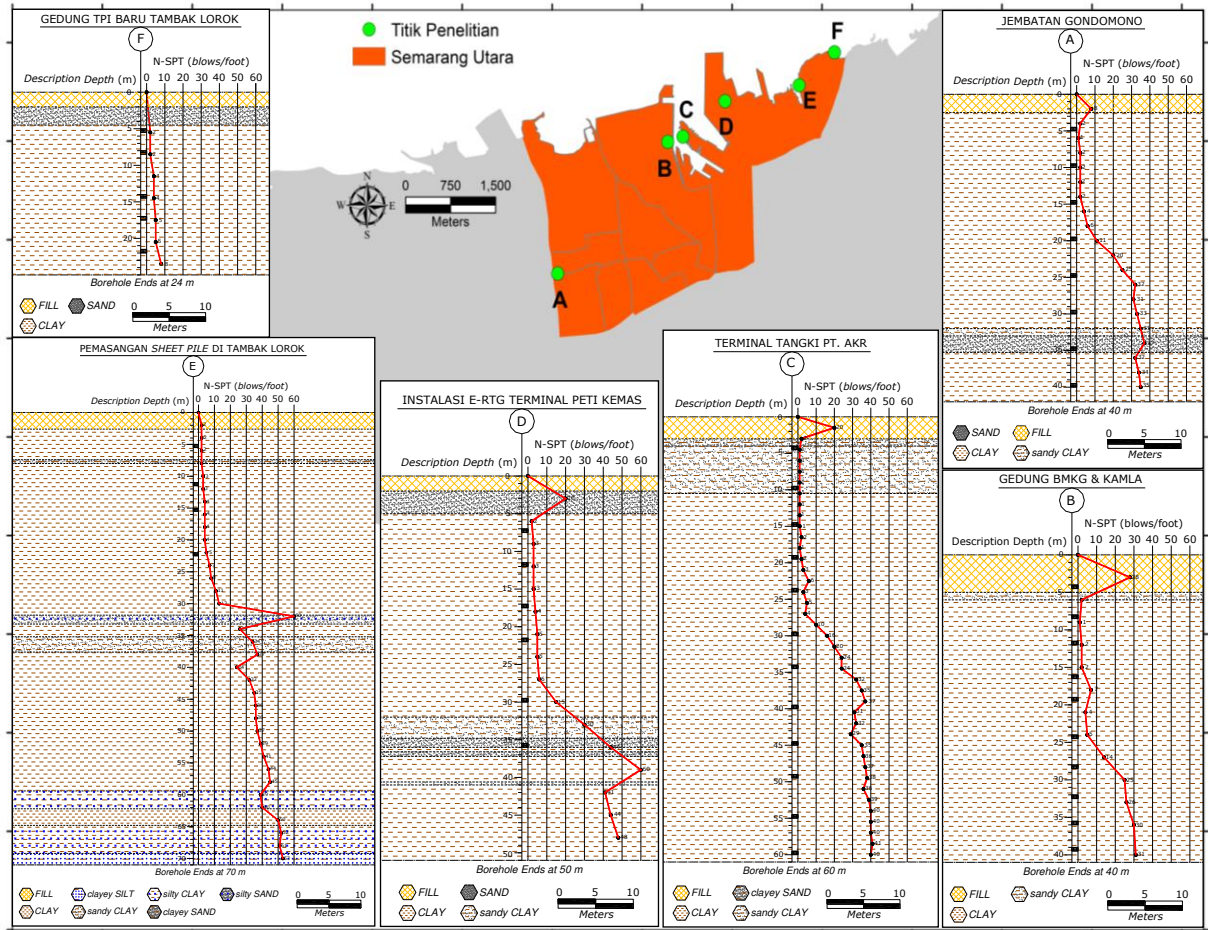
Titik D (Instalasi E-RTG Terminal Peti Kemas) berada di Kel. Tanjung Mas. Hasil stratigrafi tipikal di Titik D menunjukkan bahwa tanah lempung dengan ketebalan >40 m berada di bawah tanah timbunan setinggi 2 m dan lapisan tanah pasir setebal 3 m dengan kedalaman *borehole* mencapai 50 m di bawah permukaan tanah. Terdapat lensa pasir pada kedalaman 34 m dibawah permukaan tanah.

Tanah permukaan disekitar lokasi Titik B, C dan D sebagian besar berupa tanah timbunan akibat reklamasi lahan di Kawasan Pelabuhan Tanjung Mas, karena elevasi muka air laut hampir sama dengan elevasi jalan raya.

Titik E (Pemasangan *sheet pile* di pemukiman nelayan Tambak Lorok) berada di Kel. Tanjung Mas. Hasil stratigrafi tipikal di Titik E menunjukkan bahwa tanah lempung dengan ketebalan >60 m berada di bawah tanah timbunan setebal 2,6 m dengan kedalaman *borehole* mencapai 70 m di bawah permukaan tanah. Terdapat beberapa lensa pasir tipis dan ditemukan tanah lanau kelempungan dengan konsistensi keras pada kedalaman 69 m di bawah permukaan tanah.

Titik F (Gedung TPI baru Tambak Lorok) berada di Kel. Tanjung Mas. Hasil stratigrafi tipikal di Titik F menunjukkan bahwa tanah lempung dengan ketebalan >15 m berada di bawah tanah timbunan setinggi 2 m dan lapisan tanah pasir setebal 2,5 m dengan kedalaman *borehole* mencapai 24 m dibawah permukaan tanah. Lokasi TPI Tambak Lorok ini sudah tidak bisa diakses karena sudah tenggelam akibat abrasi dan penurunan tanah.

Dilakukan pengecekan kembali mengenai diskripsi jenis tanah hasil pengamatan secara visual berdasarkan data hasil pengeboran (*borehole*). Evaluasi nilai N-SPT dilakukan untuk tanah berbutir kasar (pasir dan kerikil), sedangkan pada tanah lempung dan lanau juga dilakukan evaluasi terhadap nilai N-SPT, kuat geser *undrained* dan *index properties* tanah untuk memastikan tingkat konsistensi dan kandungan fraksi tanah sebagaimana aturan diskripsi tanah pada BS 5930:1999 (1999).



Gambar 4.2. Stratigrafi & lokasi penelitian penurunan konsolidasi di Semarang Utara

4.3. Penurunan Tanah & Laju Konsolidasi

Uraian pelapisan tanah dan parameter yang digunakan dalam perhitungan penurunan konsolidasi untuk masing-masing titik penelitian ditunjukkan sebagaimana pada Tabel 4.1. Digunakan parameter m_v hasil pendekatan korelasi antara N-SPT dengan m_v dan c_v pada nilai N-SPT minimum, dengan asumsi bahwa nilai c_v konstan sepanjang ketebalan lapisan tanah yang berkonsolidasi. Nilai c_v diperoleh dari Persamaan 2.5, dengan besarnya nilai koefisien permeabilitas tanah (k) ditentukan secara pendekatan sebagaimana ketentuan besarnya nilai tipikal k pada BS 8004:1986 (1998).

Pada analisis perhitungan penurunan konsolidasi ini dibatasi hanya dilakukan untuk tanah lempung dan lanau dengan konsistensi sangat lunak sampai dengan medium, sedangkan untuk konsistensi kaku sampai dengan keras diasumsikan tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap total penurunan konsolidasi secara keseluruhan. Adapun lensa pasir yang berada ditengah-tengah lapisan konsolidasi diasumsikan bukan merupakan lapisan drainase dan tidak diperhitungkan. Beban permukaan yang dihitung dibatasi hanya akibat beban timbunan saja, sedangkan beban konstruksi bangunan dan perubahan tegangan *overburden* efektif akibat turunnya elevasi muka air tanah tidak diperhitungkan sebagai tambahan beban.

Tabel 4.1. Input parameter s_c berdasarkan hasil korelasi N-SPT dengan m_v

Titik lokasi	Jenis tanah	Konsistensi	Tebal (m)	N-SPT	m_v (m^2/kN)	c_v (m^2/s)
A.	Tanah timbunan	-	2,00	-		
	Lanau kelempungan	Medium	0,50	8	1,53E-03	3,72E-07
	Lempung	Lunak	1,20	2	2,58E-03	

Tabel 4.1. (lanjutan)

Titik lokasi	Jenis tanah	Konsistensi	Tebal (m)	N-SPT	m_v (m ² /kN)	c_v (m ² /s)
	Lempung	Lunak	0,80	2	2,58E-03	3,72E-07
		Sangat lunak	2,50	1	2,69E-03	
		Sangat lunak	8,00	2	2,58E-03	
		Lunak	2,00	4	2,39E-03	
		Medium	2,00	6	2,20E-03	
		Total kedalaman	17,00			
B.	Tanah timbunan	-	5,00	-		3,72E-07
	Lempung kepasiran	Lunak	1,00	2	2,58E-03	
	Lempung	Sangat lunak	3,00	1	2,69E-03	
		Sangat lunak	8,00	2	2,58E-03	
	Lempung	Medium	2,00	7	2,12E-03	
		Medium	4,00	4	2,39E-03	
		Medium	2,00	5	2,29E-03	
		Medium	1,00	8	2,03E-03	
		Total kedalaman	21,00			
C.	Tanah timbunan	-	3,00	-		3,72E-07
	Lempung kepasiran	Sangat lepas	1,00	2	2,58E-03	
		Sangat lunak	6,50	1	2,69E-03	
	Lempung	Sangat lunak	5,50	1	2,69E-03	
		Sangat lunak	1,00	2	2,58E-03	
		Sangat lunak	2,00	1	2,69E-03	
		Sangat lunak	1,50	2	2,58E-03	
		Lunak	1,50	3	2,48E-03	
	Lempung	Medium	1,00	6	2,20E-03	
		Lunak	2,00	3	2,48E-03	
		Medium	1,00	5	2,29E-03	
		Medium	2,00	4	2,39E-03	
		Total kedalaman	25,00			
D.	Tanah timbunan	-	2,00	-		3,87E-07
	Pasir kelanauan	Medium	3,00	20	0,00E+00	
	Lempung	Lunak	3,40	2	2,58E-03	
	Lempung	Lunak	1,00	3	2,48E-03	
	Lempung	Lunak	5,80	3	2,48E-03	
		Lunak	5,60	4	2,39E-03	
	Lempung	Medium	3,40	5	2,29E-03	
		Medium	4,40	6	2,20E-03	
		Total kedalaman	26,60			
E.	Tanah timbunan	-	2,60	-		3,87E-07
	Lempung kelanauan	Sangat lunak	4,00	2	2,58E-03	
	Lempung	Sangat lunak	0,80	2	2,58E-03	
	Pasir kelempungan	Lepas	0,60	2	0,00E+00	
	Lempung	Lunak	4,00	3	2,48E-03	
		Lunak	8,00	4	2,39E-03	
		Medium	1,60	5	2,29E-03	
		Medium	0,40	5	2,29E-03	
	Lempung	Medium	1,80	7	2,12E-03	
		Medium	0,60	7	2,12E-03	
	Lempung	Medium	2,60	8	2,03E-03	
		Total kedalaman	24,40			
F.	Tanah Timbunan	-	2,00	-		3,87E-07
	Pasir	Sangat lepas	2,50	2	0,00E+00	
	Lempung	Sangat lunak	4,00	2	2,58E-03	
		Lunak	5,50	4	2,39E-03	
	Lempung	Lunak	0,50	4	2,39E-03	
		Medium	6,00	5	2,29E-03	
		Medium	3,50	8	2,03E-03	
		Total kedalaman	22,00			

Berikut ini adalah uraian hasil perhitungan penurunan konsolidasi primer s_c berdasarkan metode 1 D Terzaghi dan simulasi numeris menggunakan *software* SIGMA/W.

Besar penurunan konsolidasi tanah di Titik A (Jembatan Gondomono) menunjukkan bahwa terjadi penurunan tanah sebesar 130,09 cm dalam waktu mencapai 20,91 tahun, dengan tebal lapisan konsolidasi mencapai 17,00 m. Pembebanan permukaan yang diterima tanah di Titik A berupa beban timbunan setinggi 2,00 m.

Besar penurunan konsolidasi di Titik B (Gedung BMKG dan Kamla) adalah 395,72 cm dengan waktu konsolidasi sekitar 31,90 tahun. Besarnya penurunan tanah di Titik B, dipengaruhi oleh ketebalan lapisan konsolidasi mencapai 21,00 m dan beban timbunan setinggi 5,00 m. Beban bangunan gedung 3 lantai tidak diperhitungkan.

Penurunan konsolidasi di Titik C (Terminal Tangki PT. AKR-Jl. Deli, Pelabuhan Tanjung Mas) sebesar 296,83 cm dengan waktu konsolidasi sekitar 45,21 tahun. Ketebalan lapisan konsolidasi di Titik C sebesar 25,00 m dengan tinggi timbunan 3,00 m. Beban permukaan berupa tangki dan isinya tidak diperhitungkan sebagai tambahan beban.

Penurunan tanah di Titik D (Instalasi E-RTG di Terminal Peti Kemas, Pelabuhan Tanjung Emas) sebesar 172,96 cm dengan waktu konsolidasi 49,18 tahun. Ketebalan lapisan konsolidasi di Titik D >25,00 m dengan tinggi timbunan 2,00 m. Beban permukaan berupa kontainer dan aktivitas kendaraan maupun alat berat tidak diperhitungkan.

Penurunan tanah di Titik E (*Jetty* kapal nelayan di Tambak Lorok) sebesar 224,27 cm dengan waktu konsolidasi 41,38 tahun. Kedalaman lapisan tanah konsolidasi di Titik E mencapai 24,40 m dengan tinggi timbunan 2,60 m. Beban permukaan berupa perkerasan jalan *rigid pavement* dan konstruksi bangunan rumah penduduk tidak diperhitungkan.

Penurunan tanah di Titik F (Gedung TPI baru Tambak Lorok) sebesar 139,31 cm dengan waktu konsolidasi 33,64 tahun. Kedalaman penyelidikan tanah di Titik F hanya sekitar 22,00 m dan dengan tinggi timbunan 2,00 m. Pengaruh perubahan elevasi muka air laut dan gelombang air laut tidak diperhitungkan sebagai tambahan beban.

Simulasi numeris penurunan konsolidasi dengan program SIGMA/W,

dilakukan dengan memberikan asumsi bahwa penurunan tanah hanya terjadi pada arah vertikal (1 D) dan posisi muka air tanah sesuai dengan data *borehole*. Adapun parameter konsolidasi yang digunakan dalam simulasi numeris diperoleh dari hasil pendekatan korelasi sebagaimana pada Pembahasan 4.1.

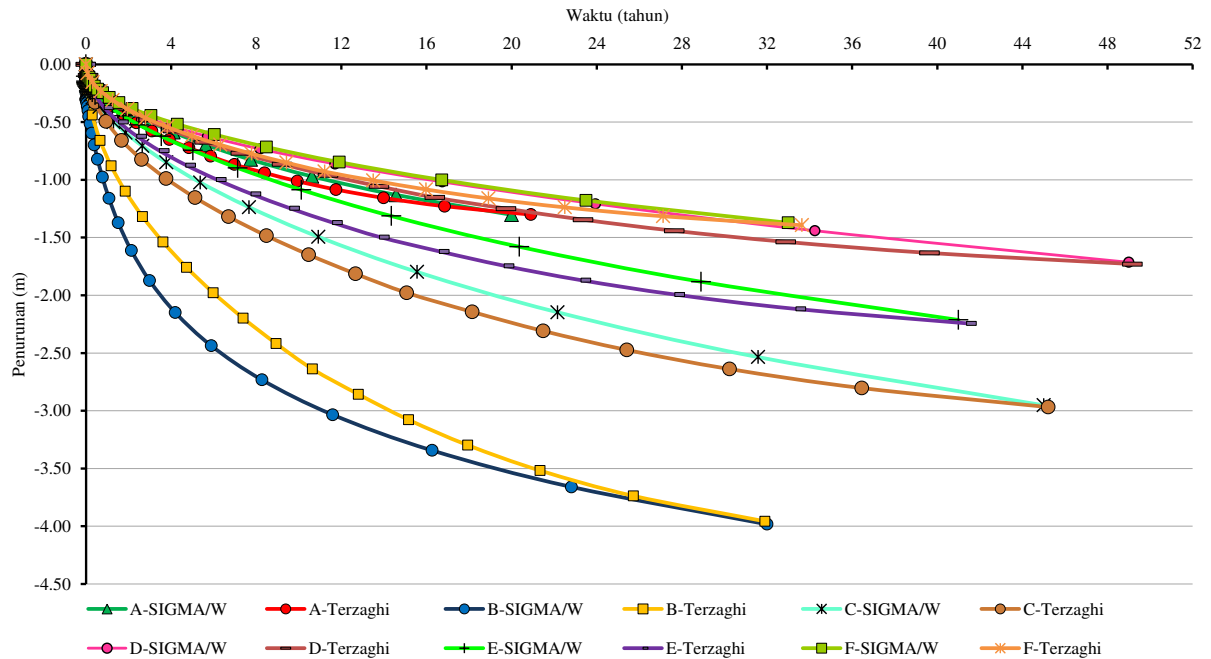
Hasil simulasi numeris menggunakan SIGMA/W menunjukkan bahwa di Titik A terjadi penurunan konsolidasi tanah sebesar 130,28 cm dengan waktu konsolidasi selama 20 tahun dan laju sekitar 6,51 cm/tahun akibat beban timbunan setinggi 2,00 m. Pada Titik B, terdapat tanah timbunan setinggi 5,00 m menyebabkan penurunan konsolidasi sebesar 398,31 cm dengan waktu konsolidasi selama 32 tahun dan laju sekitar 12,45 cm/tahun. Penurunan konsolidasi di Titik C sebesar 295,26 cm dengan laju penurunan sekitar 6,56 cm/tahun selama 45 tahun. Adapun penurunan konsolidasi di Titik D sebesar 171,44 cm dengan waktu konsolidasi selama 49 tahun dan laju penurunan tanah sekitar 3,50 cm/tahun. Besar penurunan konsolidasi di Titik E dan Titik F adalah 221,38 cm dengan laju 5,40 cm/tahun dan 137,24 cm dengan laju 4,16 cm/tahun secara berurutan.

Grafik hubungan antara besar penurunan dengan waktu konsolidasi berdasarkan hasil simulasi numeris dan perhitungan manual ditunjukkan pada Gambar 4.3. Adapun rekapitulasi perbandingan besar penurunan dan laju penurunan konsolidasi untuk masing-masing titik penelitian ditampilkan sebagaimana pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Perbandingan besar dan laju penurunan konsolidasi tanah di Semarang Utara

Titik lokasi	Besar penurunan konsolidasi (cm)		Laju penurunan konsolidasi (cm/tahun)	
	Terzaghi	SIGMA/W	Terzaghi	SIGMA/W
A	130,09	130,28	6,22	6,51
B	395,72	398,31	12,40	12,45
C	296,83	295,26	6,57	6,56
D	172,96	171,44	3,52	3,50
E	224,27	221,38	5,42	5,40
F	139,31	137,24	4,14	4,16

Berdasarkan Tabel 4.1. dapat dilihat bahwa ketebalan lapisan konsolidasi dan tinggi timbunan yang bervariasi sangat berpengaruh terhadap besar penurunan konsolidasi tanah sebagaimana rekapitulasi pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3. Hubungan antara penurunan dan waktu konsolidasi di Semarang Utara

V. KESIMPULAN

Hasil stratigrafi tipikal lapisan tanah pada titik-titik penelitian di Semarang Utara menunjukkan bahwa terdapat lapisan tanah lempung dengan konsistensi sangat lunak sampai dengan medium cukup tebal yang berpotensi mengalami konsolidasi.

Hasil perhitungan manual penurunan konsolidasi tanah berdasarkan teori 1 D Terzaghi menunjukkan bahwa besar penurunan tanah di Semarang Utara cukup bervariasi, yang dipengaruhi oleh ketebalan lapisan konsolidasi tanah dan pembebanan permukaan. Berdasarkan hasil perhitungan penurunan tanah dengan metode 1 D Terzaghi diketahui bahwa penurunan tanah terbesar berada di daerah Gedung BMKG dan Kamla (Pelabuhan Tanjung Mas) sekitar 395,72 cm dengan laju penurunan 12,40 cm/tahun.

Lamanya waktu yang dibutuhkan sampai dengan proses konsolidasi dianggap selesai, menunjukkan bahwa penurunan konsolidasi tanah akan terus terjadi untuk waktu yang sangat lama tergantung pada laju konsolidasi yang merupakan fungsi dari permeabilitas dan kompresibilitas tanah.

Hasil simulasi numeris dengan program SIGMA/W menunjukkan bahwa besar dan laju penurunan konsolidasi tidak berbeda jauh dengan hasil perhitungan manual. Perbedaan hasil perhitungan yang terjadi lebih disebabkan adanya perbedaan asumsi dalam input

parameter dan keterbatasan data *index properties* tanah.

Untuk mendapatkan hasil penurunan tanah yang mendekati kondisi sebenarnya di lapangan perlu dilakukan pengeboran dalam (sampai lapisan tanah keras) dan pengujian laboratorium (*index properties* dan uji konsolidasi) yang mewakili setiap kedalaman lapisan tanah yang ditinjau. Disamping itu, diperlukan validasi berupa hasil pengukuran penurunan tanah lapangan secara spasial menggunakan GPS secara periodik agar mendapatkan hasil yang lebih realistis.

REFERENSI

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T.P. & Fukuda, Y., (2013), "*Land Subsidence in Coastal City of Semarang (Indonesia) : Characteristic, Impacts and Causes*", Geomatics, Natural Hazards and Risk, 4(3), pp.226-240.
- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Sidiq, T.P., Gamal, M., Murdohardono, D., Supriyadi & Fukuda, Y., (2010), "*Studying Land Subsidence in Semarang (Indonesia) Using Geodetic Methods*", FIG Congress 2010, Facing the Challenges-Building the Capacity, Sydney, Australia.
- Andreas, H., Abidin, H.Z., Gumilar, I., Sidiq, T.P. & Yuwono, B., (2017), "*Adaptation and Mitigation of Land*

- Subsidence in Semarang*”, AIP Conf. Proc., 1857, pp.060005-1-060005-7.
- Atkinson, J.H. & Bransby, P.L., (1982), “ *The Mechanics of Soils*”, 1st ed. , Mc Graw-Hill, Berkshire.
- British Standart 1377:Part 5:1990, (1990), “*British Standart Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, Part 5. Compressibility, Permeability and Durability Test*”, BSI.
- Craig, R.F., (2004), “*Craig's Soil Mechanics*“ 7th ed., Spon Press, New York.
- Gumilar, I., Abidin, H.Z., Sidiq, T.P., Andreas, H., Maiyudi, R., Gamal, M. & Fukuda, Y., (2013), “*Mapping and Evaluating The Impact of Land Subsidence in Semarang (Indonesia)*”, Indonesian Journal of Geospatial, 2(2), pp.26-41.
- Kuehn, F., Hofmann-Rothe, A., Albiol, A., Cooksley, G., Granda, J., Duro, J., Haas, S & Murdohardono, D., (2010), “*Detection of Land Subsidence in Semarang, Indonesia, Using Stable Point Network (SPN) Technique*”, Environ Earth Sci, 60, pp.909-921.
- Lubis, A.M., Sato, T., Tomiyama, N., Isezaki, N. & Yamanokuchi, T., (2011), “*Ground Subsidence in Semarang-Indonesia Investigated by ALOS-PALSAR Satellite SAR Interferometry*”, Journal of Asian Earth Science, 40, pp.1079-1088.
- Sarah, D., Soebowo, E., Syahbana, A.J., Murdohardono, D., Setiawan, T., Mulyono, A. & Satriyo, N.A., (2012), “*Perhitungan Penurunan Tanah Lintasan Bandarharjo-Poncol, Kota Semarang Berdasarkan Permodelan 2 Dimensi*”, Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Puslit Geoteknologi LIPI 2012, Bandung.
- Sarah, D., Syahbana, A.J., Lubis, R.F. & Mulyono, A., (2011), “*Modelling of Land Subsidence Along Tanah Mas-Pelabuhan Section Semarang City Using Finite Element Method*”, Riset Geologi dan Pertambangan, 21(2), pp.105-119.
- Soebowo, E., Sarah, D., Murdohardono, D. & Wirabuana, T., (2014), “*Geologi Bawah Permukaan dan Amblesan Tanah di Kota Semarang*”, Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Puslit Geoteknologi LIPI 2014, Bandung.
- Soedarsono dan R. F. Arief, (2012), “*Prediksi Amblesan Tanah (Land Subsidence) pada Dataran Aluvial di Semarang Bagian Bawah*”, Prosiding Seminar Nasional Kebijakan dan Strategi dalam Pembangunan Infrastruktur Pengembangan Wilayah Berbasis *Green Technology*”, Fakultas Teknik Unissula, Semarang, Indonesia.
- Sophian, R.I., (2010), “*Penurunan Muka Tanah di Kota-Kota Besar Pesisir Pantai Utara Jawa (Studi Kasus : Kota Semarang)*”, Bulletin of Scientific Contribution, 8(1), pp.41-60.
- Wardana, D.D., Harjono, H. & Sudaryanto, (2014), “*Struktur Bawah Permukaan Kota Semarang Berdasarkan Gaya Berat*”, Riset Geologi dan Pertambangan, 24(1), pp.53-64.
- Yuwono, B.D., Abidin, H.Z., Gumilar, I., Andreas, H., Awaluddin, M., Haqqi, K.F. & Khoirunisa, R., (2016), “*Preliminary Survey and Performance of Land Subsidence in North Semarang Demak*”, In The 5th International Symposium on Earthhazard and Disaster Mitigation. Bandung, AIP.
- Yuwono, B.D., Abidin, H.Z. & Hilmi, M., (2013), “*Analisa Geospasial Penyebab Penurunan Muka Tanah di Kota Semarang*”, SNST Fakultas Teknik Unwahas Semarang, Indonesia.

